

статисти та умовах нерозривності і дає можливість визначити динамічні характеристики системи та оцінити ефективність віброізоляції конструкцій електронної апаратури.

1. Каркульовський В.І., Мотика І.І. Моделювання складних механічних систем. Геометричний аналіз // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – № 415. – С. 7–10. 2. Каркульовський В.І., Мотика І.І. Моделювання складних механічних систем. Геометричний аналіз // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – № 415. – С. 7–10. 3. Каркульовський В.І., Мотика І.І. Об'єктно-орієнтований підхід в проектуванні складних механічних систем // Вісн. Держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 1998. – № 327. – С. 26–30.

УДК 621. 825.1

В.М. Теслюк, Р.В. Загарюк, Ю.О. Кушнір
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра систем автоматизованого проектування

РОЗРАХУНОК ТА АНАЛІЗ ВИХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА ЄМНІСНОГО ТИПУ

© Теслюк В.М., Загарюк Р.В., Кушнір Ю.О., 2007

Досліджено параметри функціонування мікроакселерометра ємнісного типу. Побудовано математичну модель та розраховано його вихідні параметри. Запропоновано схему аналізу вихідних параметрів пристрою.

In this paper, an investigation of microaccelerometer functionality parameters is proposed. A mathematical model for the device was built; parameters calculations were performed. Also, an integral circuit for output parameters analysis has been proposed.

Вступ. Як показує практика, за останні роки значно підвищуються вимоги до проектування пристроїв різного функціонального призначення. Особливо це стосується мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1–4], оскільки на їх проектування та перепроектування у випадку незадовільних результатів необхідні величезні ресурси. Тому розробка методів та алгоритмів для підвищення ефективності автоматизованого проектування МЕМС [5] є актуальною задачею сьогодення.

Основною причиною поширення мікроелектромеханічних систем є відносно низька вартість їх виготовлення, висока надійність, групова технологія виготовлення, низька ціна та ін.

Ключовими елементами будь-якої мікросистеми є актюатор, мікродавач і МП-пристрій. Давач, що становить собою інтегральний пристрій, призначений для фіксації стану чи зміни стану навколишнього середовища, в якому він розміщений. Актюатор перетворює електричну енергію у керований рух, а мікропроцесорний пристрій обробляє, зберігає та передає інформацію від давача.

Конструкція акселерометра. Мікродавачі виконують різноманітні функції в технічних об'єктах залежно від їхнього призначення. Розрізняють давачі (детектори) руху, термічні давачі, давачі тиску, сенсори для вимірювання напруження матеріалу, переміщення об'єктів, їх швидкості та прискорення. Найпоширенішими є давачі для вимірювання прискорення об'єктів, або акселерометри.

Існують різні види акселерометрів, принципи дії яких переважно ґрунтуються на п'єзоєфекті чи зміні ємності при зміні форми конструкції під дією прикладеного навантаження. Більш поширеними є акселерометри ємнісного типу, оскільки їхня робота більш стабільна та менше залежить від стану зовнішнього середовища, наприклад, температури.

Принцип роботи акселерометра. Основним принципом дії ємнісного акселерометра, як було вказано вище, є зміна ємності конденсатора, утвореного конструкцією пристрою та його

рухою частиною. Конструкція акселерометра містить дві або більше пластин, одні з яких є нерухою закріплені, інші залишаються частково рухомими. При прикладенні навантаження типу прискорення переміщуються рухомі частини пристрою, що, відповідно, викликає зміну ємності конденсатора.

Основними двома видами конструкції мікроакселерометра є: (рис. 1,а) конструкція, де рухома сейсмічна маса виконує функцію рухомої пластини конденсатора; (рис. 1,б) конструкція, де функцію пластин конденсатора виконують балки, прикріплені до сейсмічної маси. Схематичні зображення обох конструкцій показані на рис. 1, а геометричні розміри балок – на рис.2.

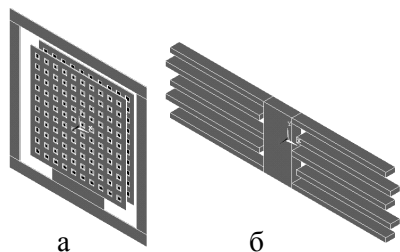


Рис. 1. Типи конструкції акселерометра

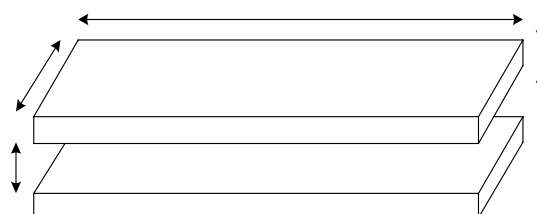


Рис. 2. Геометричні розміри балок

Залежність ємності між кожними двома балками від прискорення визначатиме чутливість пристрою. Проте основною складністю цієї структури є те, що при зміщенні балки прогинаються більше чи менше залежно від прикладеного навантаження, що спричиняє нелінійність залежності ємності від прикладеного прискорення.

Математична модель акселерометра ємнісного типу. Класичні формули визначення ємності між плоскими пластинами виявляються тут недієвими. Крім цього, потрібно врахувати, що модель акселерометра є об'ємним тілом, у якому ємності виникають не тільки між взаємно паралельними гранями балок, а взагалі між будь-якими двома гранями. Для адекватного розрахунку ємності необхідно розрахувати розподіл електричного потенціалу в середовищі, в якому знаходиться акселерометр (рис. 3).

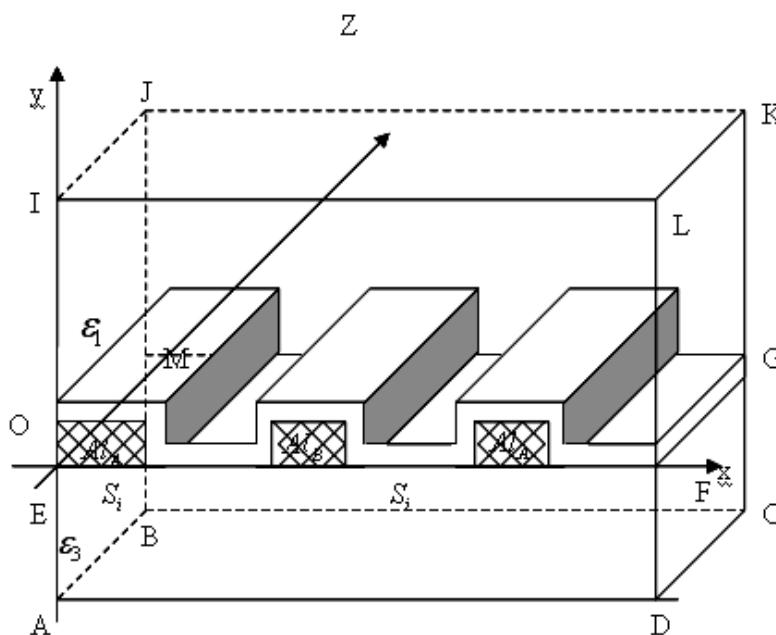


Рис. 3. Тривимірна область моделювання

Математична модель, яка передбачає визначення розподілу потенціалу в тривимірному випадку для однорідного середовища, передбачає розв'язок системи диференціальних рівнянь в частинних похідних [6–8]:

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} = 0, \text{ при } \varphi_1 \in \text{середовищу з діелектричною проникністю } \varepsilon_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} = 0, \text{ при } \varphi_2 \in \text{середовищу з діелектричною проникністю } \varepsilon_2,$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial z^2} = 0, \text{ при } \varphi_3 \in \text{середовищу з діелектричною проникністю } \varepsilon_3,$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – величина електростатичного потенціалу в середовищах 1, 2 та 3; x, y, z – просторові координати.

До цієї системи диференціальних рівнянь необхідно додати крайові умови:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial n} = 0, \text{ при } n \in S, \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_0, \quad (2)$$

при $\varphi_{2,3} \in Al_A, \varphi_2 = \varphi_3 = -\varphi_0$, при $\varphi_{2,3} \in Al_B$,

$$\varepsilon_1 \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial m} \right) \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = \varepsilon_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial m} \right) \varepsilon_1 / \varepsilon_2, \varepsilon_2 \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial m} \right) = \varepsilon_3 \left(\frac{\partial \varphi_3}{\partial m} \right), \quad (3)$$

$$\varphi_{1\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \varphi_{2\varepsilon_1/\varepsilon_2}, \varphi_{2\varepsilon_2/\varepsilon_3} = \varphi_{3\varepsilon_2/\varepsilon_3},$$

де n – нормаль до бічної поверхні області моделювання ABCVJLK; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – діелектрична проникність середовища 1, 2 та 3, відповідно; m – нормаль до границі розділу двох середовищ.

Для визначення розподілу напруженості електричного поля у випадку тривимірної області необхідно розв'язати такі рівняння:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -E, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} = -E, \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} = -E.$$

Розподіл вектора електричної індукції визначається за виразом:

$$D = \varepsilon_1 E, \text{ в області з діелектричною провідністю } \varepsilon_1, \quad (5)$$

$$D = \varepsilon_2 E, \text{ в області з діелектричною провідністю } \varepsilon_2,$$

$$D = \varepsilon_3 E, \text{ в області з діелектричною провідністю } \varepsilon_3,$$

а на границі розділу двох середовищ необхідно врахувати такі крайові умови:

$$D_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \right) E_{\varepsilon_1/\varepsilon_2}, D_{\varepsilon_2/\varepsilon_3} = \left(\frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} \right) E_{\varepsilon_2/\varepsilon_3}, \quad (6)$$

де $E_{\varepsilon_2/\varepsilon_3}$ – значення напруженості електричного поля на границі розділення середовищ 2 та 3;

$E_{\varepsilon_1/\varepsilon_2}$ – значення напруженості електричного поля на границі розділення середовищ 1 та 2; $D_{\varepsilon_1/\varepsilon_2}$ –

значення вектора електричної індукції на границі розділення середовищ 1 та 2; $D_{\varepsilon_2/\varepsilon_3}$ – значення

вектора електричної індукції на границі розділення середовищ 2 та 3.

Згідно з класичним визначенням ємності, вона визначається як відношення заряду Q до різниці потенціалів U_0 , тобто:

$$C = Q/U_0, \quad (7)$$

або відношення енергії до квадрата різниці потенціалів:

$$C = 2W/U_0^2, \quad (8)$$

де W – енергія.

У нашому випадку, якщо ми досліджуємо зустрічно-стрижневу конструкцію ємнісного давача, енергію на одиницю довжини визначають як

$$W = \frac{1}{2} \int_S \bar{D}(x, y) \bar{E}(x, y) dS, \quad (9)$$

де S – площа, яка обмежена контуром l ; $D(x, y)$ – розподіл в області моделювання вектора електричної індукції; $E(x, y)$ – розподіл в області моделювання електричного поля.

Застосовуючи вищенаведені формули до задачі визначення ємності давача зустрічно-стрижневої конструкції, необхідно визначити інтеграл (9). Для цього застосуємо стандартні формули квадратур, а попередньо модифікуємо інтеграл, щоб звести його до стандартного вигляду. Отримаємо:

$$W = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 D(x, y) E(x, y) dx dy \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n D(x_i, y_j) E(x_i, y_j) \omega_i \omega_j,$$

де $D(x_i, y_j)$ та $E(x_i, y_j)$ – значення вектора електричної індукції і напруженості електричного поля в точці з координатами x_i, y_j ; ω_i, ω_j – вагові коефіцієнти.

Отримавши значення енергії одиниці довжини та різниці потенціалів, підрахуємо ємність одиниці довжини за формулою (9). Отримане значення ємності треба перемножити на довжину штиря. Кінцева формула для визначення ємності між двома штирями набуде вигляду:

$$C = \frac{2L}{U_0^2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n D(x_i, y_j) E(x_i, y_j) \omega_i \omega_j$$

де L – довжина стрижня.

У випадку не зустрічно-стрижневої конструкції мікродавача використовують формулу для визначення ємності (8), а енергію визначають за виразом:

$$W = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 D(x, y, z) E(x, y, z) dx dy dz \approx \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n D(x_i, y_j, z_k) E(x_i, y_j, z_k) \omega_i \omega_j \omega_k,$$

де $D(x_i, y_j, z_k), E(x_i, y_j, z_k)$ – значення вектора електричної індукції і напруженості електричного поля в точці з координатами x_i, y_j, z_k ; $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ – вагові коефіцієнти.

Схема перетворення сигналів акселерометра. Сигнали від акселерометра можна обробляти підсилювачем постійного струму (ППС) з МДМ каналом [9–11]. ППС з МДМ каналом використовують для підсилення вхідної напруги нижче сотень мікрвольт. Структурну схему підсилювача наведено на рис. 4. Принцип дії ППС з МДМ полягає в тому, що напруга сигналу, що повільно змінюється, перетворюється на напругу змінного струму, амплітуда якого змінюється пропорційно до зміни вхідного сигналу. Підсилювачі змінного струму підсилюють сигнал, що перетворюється. На виході підсилювача ввімкнено випрямляч, для випрямлення підсилюваного сигналу відповідно до полярності вхідного сигналу. Перетворення вхідного сигналу на напругу змінного струму здійснюється за допомогою перетворювача частоти – модулятора.

Але враховуючи те, що сигнал, який надходить з давача, уже є промодульований частотою вібрацій, то зі структурної схеми можна вилючити модулятор, замінивши його диференційним підсилювачем. Тоді схема набуде вигляду, зображеного на рис. 5.

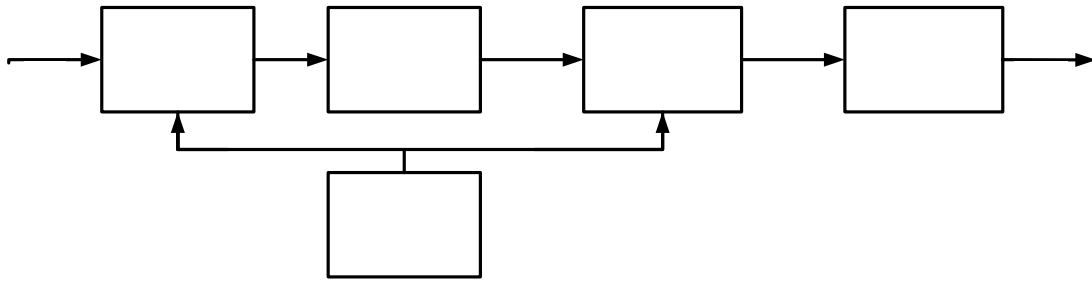


Рис. 4. Структурна схема ППС з МДМ

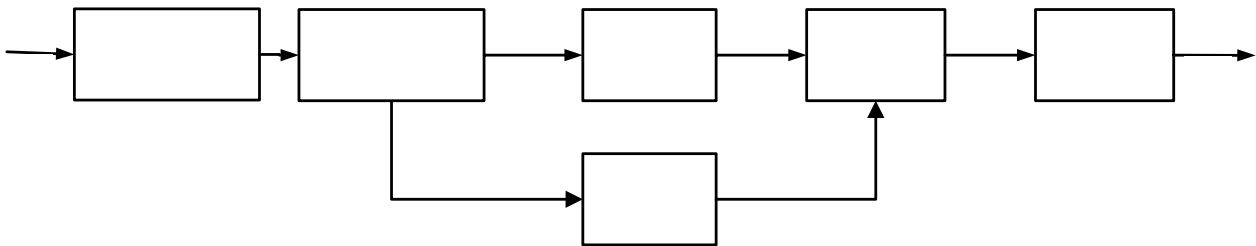


Рис. 5. Структурна схема ППС з диференційним підсилювачем

Сигнал змінного струму перетворюється на вихідний сигнал на виході підсилювача фазочутливим випрямлячем – демодулятором. На демодулятор від пристрою керування подається напруга прямокутної форми, яке називається напругою несучої або опорної частоти. Фільтр низьких частот (ФНЧ) на виході демодулятора виділяє корисний спектр сигналу і не пропускає на вихід побічні продукти перетворення, які знаходяться за частотою вище верхньої частоти вихідного сигналу. Для стабілізації параметрів перетворення ППС охоплено зворотним зв'язком. На виході ФНЧ сигнал інтегрується та надходить на вхід постійного запам'ятовувального пристрою, роль якого виконує блок фіксації аналогового сигналу (БФАС) [11] (рис. 6).

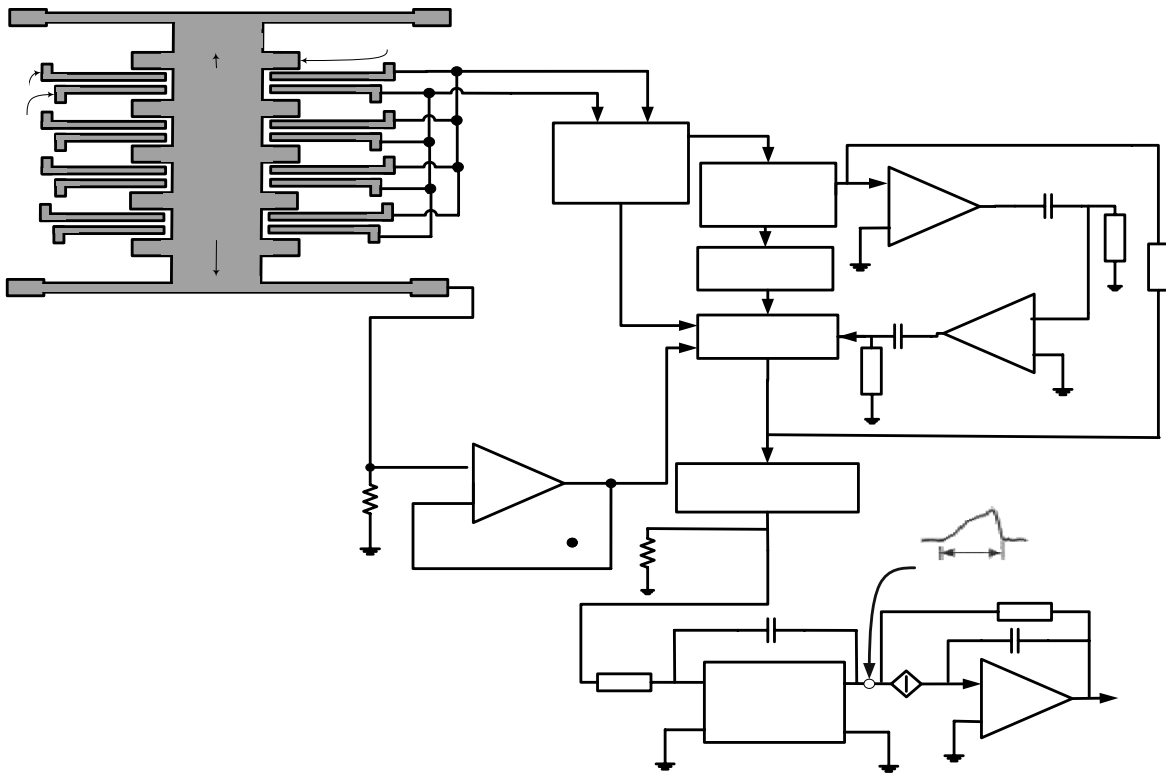


Рис. 6. Схема перетворення сигналів

Вихідний сигнал $V_{вих}$ є функцією залежності вимірюваної ємності від прикладеного прискорення: амплітуда вібрацій перетворюється на напругу постійного струму (рис. 7). На виході підсилювача змінного струму $U_{підс_2}$ сигнал має таку саму форму, як і вхідний сигнал. На виході інтегратора $U_{вих}$ сигнал набуває пилкоподібної форми і потім фіксується у постійному запам'ятовувальному пристрої U_{ϕ} із затримкою фіксації T_{ϕ} .

Результати моделювання. Для моделювання роботи акселерометра ємнісного типу та визначення ємності використано інтегроване середовище для проектування ANSYS. Це середовище дає змогу із невеликою похибкою (до 8 %) моделювати різного роду фізичні процеси. У роботі застосовано інтегрований аналіз із елементами структурного та електростатичного досліджень конструкції акселерометра.

Як видно з рисунка, візуалізація загалом груба, елементи пристрою перетинаються, проте в реальності перетинів немає, оскільки максимальне зміщення значно менше за початкову відстань між балками, що становить 10 мкм. На рис. 8 та 9 подано графіки залежності максимального зміщення та максимального напруження від прискорення, побудованих на основі даних, отриманих в ANSYS.

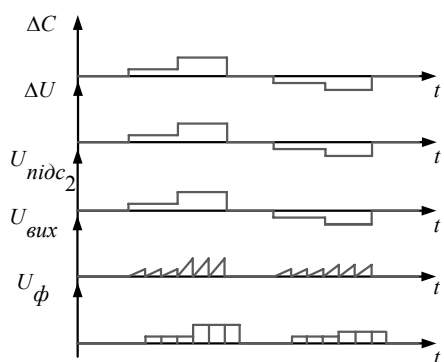


Рис. 7. Форми вхідного та вихідних сигналів

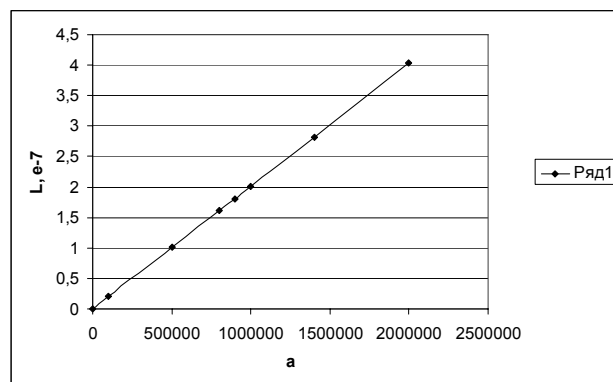


Рис. 8. Залежність деформацій від навантаження

З отриманих результатів випливає, що залежність є абсолютно лінійною, що виправдовує очікування. На рис. 9 подано аналогічну залежність максимального напруження матеріалу (у місця кріплення зовнішніх балок до анкерів) від прикладеного навантаження.

Остаточним результатом моделювання є залежність ємності конденсатора між нерухомими балками субстрату та рухомими елементами, закріпленими на сейсмичній масі (рис. 10).

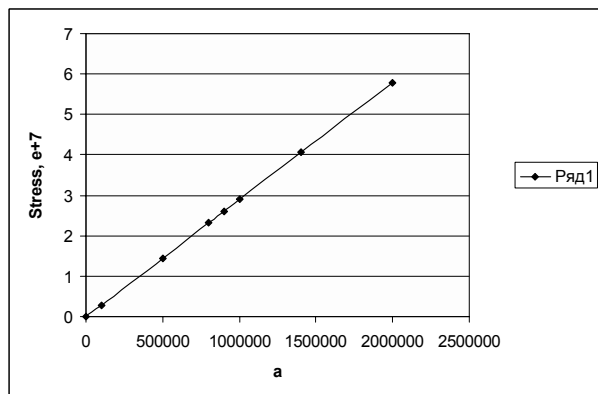


Рис. 9. Залежність максимального напруження від прискорення

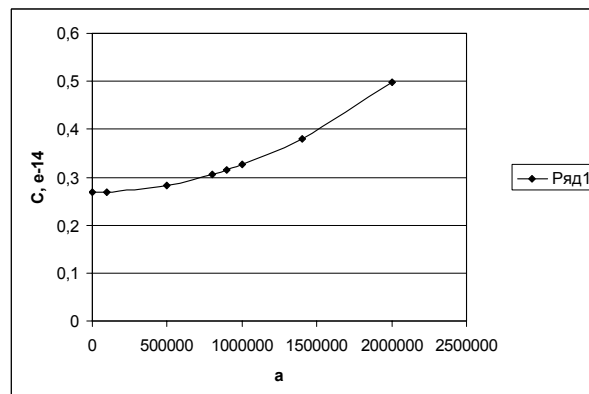


Рис. 10. Залежність ємності від прискорення

Очевидно, що залежність ємності від прискорення – нелінійна величина. Як видно з графіка, ступінь нелінійності є досить високим, що обумовлено насамперед особливостями конструкції пристрою (дуже довгі та тонкі балки досить сильно викривляються під час прикладання до них навантажень). Проте очевидно, що система ANSYS дає адекватні результати.

Висновки. Проаналізовано моделі мікроакселерометра ємнісного типу, подано його математичну модель із зазначенням складностей реалізації такої моделі. Основною проблемою, що виникла під час моделювання, є нелінійність. В ідеалі нелінійність будь-яких пристроїв, особливо давачів, має бути мінімальною для досягнення максимально ефективних результатів їх роботи. Проте в реальних пристроях в принципі обов'язково існує нелінійність різних ступенів, обумовлена великою кількістю різноманітних факторів. Нелінійність обов'язково необхідно враховувати під час побудови математичної моделі пристрою. У випадку розрахунку ємності ця особливість призводить до непридатності простих формул їхнього розрахунку.

Результати свідчать про високий ступінь нелінійності залежності ємності моделі від прикладених до неї навантажень. Проте необхідно врахувати те, що середовище для проектування ANSYS має досить високий рівень похибки обчислень, оскільки для проведення аналізу інколи застосовують великі кроки за часом та координатами. Система надзвичайно вимоглива до ресурсів ПК, від чого значною мірою залежить точність розрахунків. Очевидно, необхідно проводити дослідження у напрямку розроблення програмного забезпечення для менш ресурсоемної реалізації елементів ММ.

Розроблено схему перетворення сигналів акселерометра ємнісного типу. Цікавою ця схема є тим, що може працювати з дуже низькими вхідними напругами: нижче сотень мікрвольт. Це забезпечується підсилювачем постійного струму з диференційним підсилювачем, що обробляє сигнали від мікроакселерометра. Ця особливість є дуже важливою під час проектування саме мікроелектромеханічних систем.

Також варто зазначити, що схема дає змогу вимірювати високочастотні мікрівібрації та “биття”, що діють на акселерометр у вигляді зміни прискорення.

1. Лучинин В.В. *Микросистемная техника. Направления и тенденции развития* // *Научное приборостроение*. – 1999. – Т. 9, № 1. – С. 3–18. 2. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. *Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке* // *Микросистемная техника*. – 1999. – № 1. – С. 3–6. 3. Теслюк В.М. *Побудова множини можливих рішень з допомогою I – АБО – дерева при вирішенні задач структурного синтезу на системному рівні проектування МЕМС* // *Інформаційні технології і системи*. – Львів, 2006. – Т. 9, № 1. – С. 101–108. 4. Качяев И.А., Котов В.Н., Клиндухов В.Г., Кухаренко А.П. *Микроэлектронные сенсорные системы опыт создания и применения* // *Микросистемная техника*. – 1999. – № 1. – С. 32–35. 5. Норенков И.П. *Основы теории и проектирования САПР*. – М.: Высш. шк., 1990. – 334 с. 6. Тамм И.Е. *Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов*. – 10-е изд., испр. – М.: Наука, 1989. – 504 с. 7. Теслюк В.М., Раєвський П.Ю., Лобур М.В., Денисюк П.Ю. *Модель інтегрального сенсора електростатичного типу* // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*: – Львів, 2004. – № 522. – С. 175–180. 8. Teslyuk V., Lobur M., Rayevskyy P., Kernytskyu A., Denysyuk P. *Design of Output Parameters of Integral Capacity Sensor* // *Proc of the VIII-th Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2005)*. – Lviv – Polyana, Ukraine, 2005. – P. 528–530. 9. Нестеренко Б.К. *Интегральные операционные усилители*. – М.: Энергоиздат, 1982. 10. Вайсбурд Ф.И., Панаев Г.А., Савельев Б.Н. *Электронные приборы и усилители*. – М.: Радио и связь, 1987. 11. Иванцов Р.-А.Д., Романюк С.Ф. и Сакаль В.М. *Фазовый детектор: Описание изобретения к авторскому свидетельству СССР № 686140*, 1977.